

Schlussbericht

Die Süßwasserbilanz des Nordpolarmeers - langfristige Variabilität und mögliche zukünftige Entwicklungen

Förderkennzeichen: 01 LD 0047

Antrag im Rahmen des Verbundprojekts DEKLIM

Laufzeit des Vorhabens: 1.9.2001 - 31.5.2006

Antragsteller: Prof. Dr. R.Gerdes
Projektwissenschaftler: C.Köberle

Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der
Helmholtz-Gemeinschaft, Fachbereich Klimawissenschaften
Postfach 120161, D-27515 Bremerhaven

Antragsteller

Prof. Dr. Rüdiger Gerdes
Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Fachbereich Klimawissenschaften
Postfach 120161, D-27515 Bremerhaven
Tel. +49 471 4831 1827
Fax +49 471 4831 1797
Ruediger.Gerdes@awi.de

I.1. Aufgabenstellung

Das Projekt will einen Beitrag zum Verständnis dekadischer und längerfristiger Klimavariabilität leisten. Es konzentriert sich auf die Süßwasserbilanz des Nordpolarmeers und den Austausch zwischen Nordpolarmeer und Nordatlantik, weil hier mögliche Ursachen für Wechsel zwischen ozeanischen Zirkulationsregimes liegen. Mehrjährige Eisakkumulation und advective Ausbreitung von Signalen im Ozean sollen auf die Möglichkeit von Langfristvorhersagen untersucht werden.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zu Beginn des Projekts existierte eine grobauflösende Modellversion des gekoppelten Ozean-Meereis Modells NAOSIM (North Atlantic/Arctic Sea Ice Ocean Models). Erfahrung mit dem Betrieb dieses Modells, der Aufbereitung von Antriebsdaten und der Analyse der Ergebnisse war vorhanden. Wichtige Aspekte der ozeanischen Zirkulation, des Meereisverhaltens und der Ozean-Meereis Wechselwirkung waren in dieser Modellversion bereits gründlich validiert worden.

Wichtige Vorarbeiten im Bereich der großskaligen Zirkulationsmodellierung sind mit dem Modular Ocean Model (MOM2, Pacanowski, 1996) in der Nordpolarmeer-Version des AWI durchgeführt worden. Das Modell hat gezeigt, daß es selbst in der grob auflösenden Variante in der Lage ist, die wesentlichen Elemente der Arktischen Zirkulation wiederzugeben, wie etwa den Beaufort Wirbel, die Transpolare Drift und

die Aufspaltung des einströmenden Atlantischen Wassers in einen die Schelfe überströmenden Teil, sowie einen durch die Framstraße eindringenden Teil (Gerdes und Schauer, 1997). Gerade hier entscheidet sich der weitere Weg von Wassermassen höherer Dichte welche den Schelf verlassen. Gemäß ihrer Dichte strömen sie den Schelfabhang hinab und treten in Wechselwirkung mit dem Kern des Framstraßenzweiges des Atlantischen Wassers.

Die Auswirkungen eines anomal hohen Eisexport aus dem Nordpolarmeer sind mit demselben Modell untersucht worden (Gerdes und Köberle, 1995). In Übereinstimmung mit Beobachtungen der Großen Salzgehaltsanomalie (GSA, Dickson et al., 1988) wird eine Salzgehaltsanomalie simuliert, die in der Islandsee durch Schmelzen der Eisanomalie entsteht und innerhalb weniger Jahre in die Labradorsee advehiert wird, wo sie tiefe Konvektion für einige Jahre unterbricht. Ausbreitungswege und -zeiten stimmen gut mit Beobachtungen überein. In idealisierter Konfiguration sind die grundsätzlichen Rückkopplungsmechanismen von Ozean, Meereis und Atmosphäre auf Salzgehaltsanomalien in hohen Breiten untersucht worden (Lohmann et al., 1996; Lohmann und Gerdes, 1998).

In Simulationen mit realistischem atmosphärischen Antrieb (NCEP und EZMW Reanalysen) wurden insbesondere die Ausbreitung von Temperaturanomalien und die Variabilität des arktischen Meereises untersucht. Das Europäische Nordmeer zeichnet sich durch lokal erzeugte, mit dem NAO Index korrelierte SST Anomalien aus, die mit der zyklonalen Zirkulation in den subpolaren Atlantik transportiert werden. In der Labradorsee treffen die Anomalien vier bis fünf Jahre später ein und werden dort in der Gegenphase der NAO verstärkt. Damit gelangen sie im subpolaren Wirbel bis nach Schottland zurück. Dies im Norden entstandene Signal ist dort wesentlich stärker als aus niedrigeren Breiten heran transportierte Signale (Sutton und Allen, 1997).

Im Rahmen des EU Projekts VEINS wurde die advective Ausbreitung von Temperatur- und Salzgehaltssignalen intensiv untersucht. Die Ergebnisse sind in Gerdes (2000, Manuskript erhältlich vom Autor) zusammengefasst und sind in den

Abschlußbericht des Projekt eingeflossen sowie in Karcher et al. (2003) und Gerdes et al. (2003) veröffentlicht worden. Neben den mehrjährigen advektiven Signalen standen hier Zeitreihen der Transporte durch die Passagen im Vordergrund, die das Europäische Nordmeer mit dem Nordpolarmeer und dem subpolaren Atlantik verbinden. Die Modellergebnisse wurden benutzt, um die Zusammenhänge der individuellen Transporte untereinander, mit dem atmosphärischen Antrieb und den großräumigen ozeanischen Transportmustern herauszufinden. Die Modellierung von Süßwassertransporten durch die Framstraße wurde von Gerdes (2000) gesondert dargestellt. Einzelne Aspekte des Antwortverhaltens des Ozean-Meereis Systems auf Änderungen des atmosphärischen Antriebs, insbesondere wie sie im Zusammenhang mit der NAO auftreten, wurden von Gerdes und Köberle (1999) und von Brauch et al. (1999) sowie von Brauch und Gerdes (2005) untersucht.

Besonderes Interesse galt auch der Entstehung von Meereisanomalien im Nordpolarmeer und deren Zusammenhang mit dem Eisexport durch die Framstraße. Positive Anomalien im arktischen Eisvolumen bauen sich über mehrere Jahre auf. Dafür sind Temperatur- und Windanomalien von vergleichbarer Bedeutung (Köberle et al., 1999). Das Eis akkumuliert vorzugsweise über der Ostsibirischen See. Dort treten bei Eisexportereignissen, die positive Eisanomalien innerhalb von ein bis zwei Jahren wieder abbauen, drastische Veränderungen der Eisbedeckung und der Eisdicke auf. Diese Änderungen wirken sich auf die Erwärmung der ozeanischen Deckschicht im Frühjahr und Sommer aus und haben unter Umständen auch Rückwirkungen auf die atmosphärische Zirkulation.

I.3. Planung und Ablauf

Die Modellversion COSMOS (Prange und Gerdes, 2006) mit einer freien Oberfläche erwies sich als unerwartet resistent gegenüber der Einführung offener Randbedingungen; außerdem sind Antriebsdaten und die klimatologischen Oberflächensalzgehalte nicht in Übereinstimmung zu bringen. Die notwendige dämpfungsfreie Formulierung der Oberflächenrandbedingung für Salz wurde stattdessen mit der Einführung eines zeitlich konstanten Korrekturflusses erreicht.

Die geplante Untersuchung der arktischen Süßwasserbilanz in Simulationen mit realistischem atmosphärischen und hydrologischen Antrieb für die letzten 50 Jahre (hindcast) wurde mit den Reanalyse Daten des NCEP für den Zeitraum 1948-2003 durchgeführt.

Auf den Einsatz eines run-off Modells (Hagemann und Dümenil, 1998) konnte verzichtet werden, weil wir die entsprechenden Daten für vertrauenswürdig befunden haben und weil die Variabilität in den Daten klein ist gegenüber dem Mittel (Peterson et al., 2002).

Trends und langfristige Veränderlichkeit der einzelnen Komponenten der Süßwasserbilanz des Nordpolarmeers wurden analysiert, es wurde eine Gesamtbilanz des Arktischen Süßwassergehalts und aller Zu- und Abflüsse aufgestellt. Der Vergleich mit Daten ergab zufrieden stellende Ergebnisse.

Die Einführung einer offenen Randbedingung für die Beringstrasse verbesserte die Simulation der ozeanischen Zirkulation im Nordpolarmeer. Insbesondere breitet sich das Pazifische Wasser nun auf einem realistischen Weg aus.

Die Experimente mit konstruierten Antriebsfeldern, die verschiedene mögliche Entwicklungen der NAO repräsentieren, haben wir wie geplant durchgeführt. Meereisverhältnisse im Nordpolarmeer, Meereisexport und die Lage der Subpolarfront reagieren so, wie aus Beobachtungen geschlossen worden war (Brauch und Gerdes, 2005). Weitere Modellläufe ergaben aber, dass es zum Beispiel im Meereisexport auch Phasen mit von der NAO unabhängiger Variabilität gibt (Köberle und Gerdes, 2003). Außerdem hat sich herausgestellt, dass nicht alle IPCC Modelle einen erneuten Anstieg der NAO vorhersagen. Daher haben wir ein zusätzliches Experiment mit einem Zukunftsszenario wie folgt konzipiert: Wegen der starken Abhängigkeit des Meereises vom atmosphärischen Antrieb haben wir verfügbare Meereisergebnisse für die letzten 50 Jahre des 20C3M Laufs des IPCC mit einem "hindcast" unseres Ozean-Meereis Modells verglichen, um den atmosphärischen Antrieb für das 21te

Jahrhundert auszuwählen. Ergebnisse aus dem A1B Zukunftsszenarium für das aus diesem Vergleich als bestes hervorgegangene Klimamodell liefern dann die Antriebsdaten für Simulationen mit NAOSIM. Die Rechnungen mit diesem Antrieb sind wegen Problemen bei der Datenbeschaffung noch nicht fertig ausgewertet.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Einen aktuellen Überblick über die ozeanische Süßwasserbilanz des Nordpolarmeers findet man bei Carmack (2000). Die Werte in dieser Arbeit sind überwiegend aus Einzelmessungen abgeleitete Größen.

Die salzarmen Wasser des Ostgrönlandstroms tragen zum Süßwassereintrag ins Europäische Nordmeer und die Labradorsee bei (Aagaard and Carmack, 1989). Der Strom durch den Kanadischen Archipel beeinflusst direkt die Labradorsee (Melling, 2000). Beide Ausbreitungswege repräsentieren Elemente des Klimasystems der hohen Breiten, die die globale thermohaline Zirkulation beeinflussen, indem sie die Dichteschichtung in den Tiefenwasserbildungsgebieten des Nordatlantiks mitbestimmen (Mauritzen und Häkkinen, 1997). Die Great Salinity Anomaly (GSA) ab der Mitte der 1960er Jahre und während der 1970er Jahre (Dickson et al., 1988) ist ein herausragendes Beispiel für diesen Zusammenhang. Spätere ähnliche Ereignisse sind aus hydrographischen Daten abgeleitet worden (Reverdin et al., 1994; Belkin et al., 1998).

Es gibt Hinweise darauf, dass mehrere Komponenten der arktischen Süßwasserbilanz während der letzten Jahrzehnte großen Veränderungen unterworfen waren. Langfristige Trends in der Atmosphäre und die quasi-dekadische Variabilität der Nordatlantischen Oszillation (NAO) haben sich in den letzten Jahren zu einem Extremzustand des arktischen Klimas überlagert (Dickson et al., 2000).

Mit den langfristigen Veränderungen in der NAO und damit verbunden in den Zugbahnen der Tiefdruckgebiete (Rogers, 1990, Beersma et al., 1997) gehen Änderungen der atmosphärischen Feuchtetransporte von mittleren zu hohen Breiten einher. Eine

zunehmend meridional orientierte Zugbahn führt mehr Feuchtigkeit in das Einzugsgebiet des Nordpolarmeers. Während numerische Sensitivitätsstudien vorlagen (z.B. Gerdes und Köberle, 1999) fehlten systematische Untersuchungen zum Einfluss dieser Veränderungen auf das Ozean-Meereissystem im Nordpolarmeer.

Ozeanische Transporte von Salz und Süßwasser unterliegen ebenfalls erheblichen Veränderungen. Rudels und Friedrich (2000) geben eine Übersicht der beobachteten Austauschraten zwischen Nordpolarmeer und Europäischem Nordmeer. Gerdes (2000) diskutiert entsprechende Modellergebnisse. Einige Modelle liefern eine zyklonale Zirkulationsschleife im Europäischen Nordmeer und im Nordpolarmeer als unmittelbare Antwort auf eine positive Phase der NAO (Zhang et al. 1998). Damit ist ein erhöhter Ausstrom von relativ salzarmem Wasser aus dem Nordpolarmeer verbunden. Andererseits deuten Ausbreitungszeiten zwischen 3 und 10 Jahren von Salzgehaltsanomalien von den Entstehungsregionen in den sibirischen Schelfmeeren zur Framstraße darauf hin, daß generell kein fester Zusammenhang zwischen NAO und südwärtigem Transport von salzarmem Wasser durch die Framstraße besteht (Häkkinen 1993, Gerdes und Köberle, 1999). Eine wichtige Fragestellung betrifft die Existenz von unterschiedlichen Moden der Variabilität im Nordpolarmeer, wie diese Moden vom lokalen atmosphärischen Antrieb abhängen, von den Randbedingungen zum offenen Atlantik im Süden, und welche Phasenbeziehung zwischen dem Süßwassertransport und dem atmosphärischen Antrieb bestehen.

In einem einfachen Modell der Salzbilanz in den oberen Schichten des Nordpolarmeers fanden Steele et al. (1996) zwischenjährliche Variabilität im Süßwasserexport aus dem Nordpolarmeer durch Framstraße und Kanadischen Archipel. Die Transporte durch beide Wege steigen in einem Szenario mit sich erwärmendem Klima an. Nach dieser Analyse steigt der Transport durch den Kanadischen Archipel schneller an als der durch die Framstraße. Dies hat mögliche Konsequenzen für die relative Stärke der Tiefenwasserproduktion im Europäischen Nordmeer und in der Labradorsee.

Im Vergleich von Beobachtungen zweier Expeditionen ins Eurasische Becken 1991

und 1996 fanden Schauer et al. (2002) eine Abnahme des Salzgehalts in einer Schicht zwischen 500 und 1200m Tiefe im Amundsen Becken. Sie führten das auf erhöhten Ausstrom aus der Barentssee zurück, der in einen ostwärtigen Randstrom am Schelfhang des Eurasischen Beckens mündet (Schauer et al., 1997, Gerdes und Schauer, 1997). Schauer et al. (2002) bestätigten auch den Rückgang der arktischen Halokline aus dem zentralen Eurasischen Becken in den letzten Jahren, der zuerst von Steele and Boyd (1998) entdeckt worden war. Veränderungen der Halokline im Amundsen Becken haben Folgen für Ozean-Atmosphäre Flüsse und die Eisbedingungen im betroffenen Bereich, weil die Wärme der Atlantischen Schicht eher zum Schmelzen von Eis und für die Erwärmung der darüber liegenden Luft zur Verfügung steht. Der Rückgang der Halokline deutet auf mögliche Veränderungen in den Ausbreitungswegen des Süßwassers im Nordpolarmeer, die Folgen für den Süßwasserexport in das Europäische Nordmeer und allgemeiner die Tiefenwasserbildungsgebiete des Nordatlantiks haben könnten.

Änderungen in der Menge des in der Halokline gespeicherten Süßwassers stellen einen komplizierenden Aspekt in der Süßwasserbilanz des Nordpolarmeers dar, der eine einfache Gleichsetzung von Einstrom und Ausstrom auf der Zeitskala unterhalb mehrerer Jahre verhindert. Ein ähnlicher und vielleicht noch wichtigerer Effekt geht von der mehrjährigen Speicherung von Süßwasser im Meereis aus, da diese gespeicherten Süßwassermengen in Exportereignissen von nur ein oder zwei Jahren Dauer wieder freigegeben werden können. Der Meereisexport aus dem Nordpolarmeer durch die Framstraße ist während der letzten zehn Jahre gemessen worden (Vinje et al., 1998; Kwok und Rothrock, 1999). Die vorhandene Zeitreihe enthält mindestens ein Eisexportereignis, das mit dem atmosphärischen Antrieb während des hohen NAO-Index Winters 1994/95 verbunden war. Allerdings besteht eine hohe Korrelation zwischen Framstraßen Eisexport und NAO anscheinend erst seit etwa der Mitte der 1970er Jahre. Hilmer und Jung (2000) führten das auf eine Verschiebung des mit der NAO zusammenhängenden Tiefdruckgebiets über dem Europäischen Nordmeer und dem Eurasischen Becken zurück. Fluktuationen der Eisgeschwindigkeit in der Framstraße werden zunehmend bedeutend für die Variabilität des Eisexports (Hilmer et al., 1998), weil die Bedeutung von Eisdicken-

schwankungen wegen der insgesamt zurückgehenden Eisdicke schwindet (Rothrock et al., 1999). Der Zusammenhang zwischen Windantrieb und Eisdickenverteilung im Nordpolarmeer sowie dem Export von Meereis durch die Framstraße und den Kanadischen Archipel haben Arfeuille et al. (2000) anhand von Resultaten eines Meereismodells beschrieben. Sie fanden, dass großen Eisexportereignissen in der Regel der Aufbau von Eisvolumenanomalien in der Ostsibirischen See vorausgeht. Dies ist allerdings nicht der Fall für den Zeitraum 1990-1998. Eisexporte haben hier zu einer Abnahme des Eisvolumens geführt. Da Arfeuille et al. langfristige Änderungen in der Lufttemperatur nicht berücksichtigen, bleibt unklar, wieweit dynamische und thermodynamische Prozesse zu Schwankungen des Eisvolumens und des Eisexports beitragen.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der kontinuierliche Kontakt der in AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project) arbeitenden Wissenschaftler aus inzwischen 15 internationalen Arbeitsgruppen erwies sich als sehr hilfreich. Der Vergleich verschiedener Aspekte der Modellergebnisse erlaubt die Einordnung der eigenen Modellfamilie und dient der Validierung der eigenen Ergebnisse.

Insbesondere die augenblicklich stattfindende Auswertungs- und Veröffentlichungsphase erlaubt den Vergleich einer Fülle von Modellparametern im Umfeld fast aller zur Zeit existierender Eis-Ozeanmodelle der Arktis.

Unsere Arbeitsgruppe ist mit der Analyse von Daten aus dem Fourth Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), die wir als Antriebsdaten benutzen, in die weltweite Gemeinschaft der IPCC Auswerter eingebunden.

Das Modell wird im SFB 512 und im EU Projekt DAMOCLES (Developing Arctic Modelling and Observing Capabilities for Longterm Environmental Studies) für andere Fragestellungen eingesetzt.

II.1. Erzielte Ergebnisse

Das Nordatlantik Modell NAOSIM wurde für die DEKLIM Experimente eingerichtet. Die Implementation folgt den Spezifikationen des internationalen Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP), das einen umfassenden Vergleich der Resultate von Ozean-Eis Modellen vorsieht, die das Nordpolarmeer abdecken. Dabei wurden möglichst identische Anfangs- und Oberflächenrandbedingungen angestrebt, während die interne Modellphysik (Parametrisierungen, numerische Verfahren, Auflösung) und seitliche Randbedingungen den einzelnen Modellgruppen überlassen blieb. Eine vollständige Beschreibung der AOMIP Vorgaben ist unter http://fish.cims.nyu.edu/project_aomip/overview.html zu finden. Hinsichtlich der Rechnungen zur arktischen Süßwasserbilanz ist wichtig, dass hier der kontinentale Abfluss verwendet wird, wie er ursprünglich für das DEKLIM Projekt geplant war. Die Flüsse werden entsprechend der Daten des Global Run-off Data Center (GRDC) in der Aufbereitung von Prange (2003) verwendet. Hinzu kommt ein Anteil von 700 km³/Jahr an nicht durch Pegel erfasstem Abfluss. Ausstrom aus nicht arktischen Flüssen und diffuser Abfluss von Norwegen ist ebenso berücksichtigt wie der Ausstrom von salzarmem Wasser aus der Ostsee und die Transporte durch die Beringstrasse.

Neben potentieller Temperatur und Salzgehalt wurde $\delta^{18}\text{O}$ als passive Tracer mitgerechnet, um die Ausbreitung von Flusswasser im Modell zu verfolgen und zusätzliche Vergleichsmöglichkeiten mit Beobachtungen zu gewinnen. Es wurden deutliche Effekte der Flusswasserzufuhr, der Ostsee und des Abflusses von Norwegen sichtbar. Veränderungen sind nicht auf die unmittelbare Umgebung des Süßwasser eintrags beschränkt. Deutliche Signale sind auch im Norwegischen Küstenstrom und im Ostgrönlandstrom festzustellen.

Das Restoring des Oberflächensalzgehalts wurde durch einen zeitlich konstanten Korrekturfluss ersetzt, der die Variabilität im Arktischen Frischwassergehalt und den Komponenten der Süßwasserbilanz klarer zu bewerten erlaubt. Damit ist die Aus-

sage abgesichert, dass die Variabilität im Oberflächensalzfluss im Wesentlichen durch die Variabilität der Netto-Eisproduktion bestimmt wird. Eine Verbesserung in der Formulierung des Flusswassereintrags sollte den Korrekturfluss weiter vermindern. Diese Änderung wurde aber zurückgestellt, da der Eintrag durch die Flüsse nur einen vergleichsweise kleinen Beitrag zur Variabilität der Süßwasserbilanz liefert.

Die technische Realisierung des Einstroms durch die Beringstraße mit Hilfe einer offenen Randbedingung, ergab deutlich realistischere Salzgehaltsverteilungen im westlichen Nordpolarmeer und einen erhöhten Ausstrom durch das kanadische Archipel. Dieser höhere Transport wird durch neuere Messungen von Melling (2000) und Prinsenbergh und Hamilton (2004) belegt. Der bedeutendere Transport durch den Kanadischen Archipel ändert aber wenig an der Variabilität des Gesamttransports durch die Straßen und an der Dominanz der Variabilität des Framstraßentransports.

Aufeinander folgende viermalige Anwendung des Antriebsdatensatzes ergab einen 216 Jahre langen Modelllauf. Die Variabilität sowohl des Eisvolumen als auch des Süßwassergehalts des Nordpolarmeers sind abgesehen von einer längeren Anpassungsphase zu Beginn jeder Wiederholung ähnlich. Eisvolumen und Süßwassergehalt wachsen nach einem starken Abfall zum Ende des Antriebsdatensatzes (1990-2000) mit dem Einsetzen des Beginns des Antriebsdatensatzes wieder an.

Das ozeanische Süßwasserreservoir in der zentralen Arktis weist ein hohes Niveau in der Mitte der 1960er Jahre und einen Rückgang in den folgenden Jahren auf (Abb. 1). Der Einfluss der Anfangswerte ist über einen Zeitraum von etwa 15 Jahren zu sehen. Dieser Zeitraum ist konsistent mit der Erneuerungsrate der arktischen Halokline.

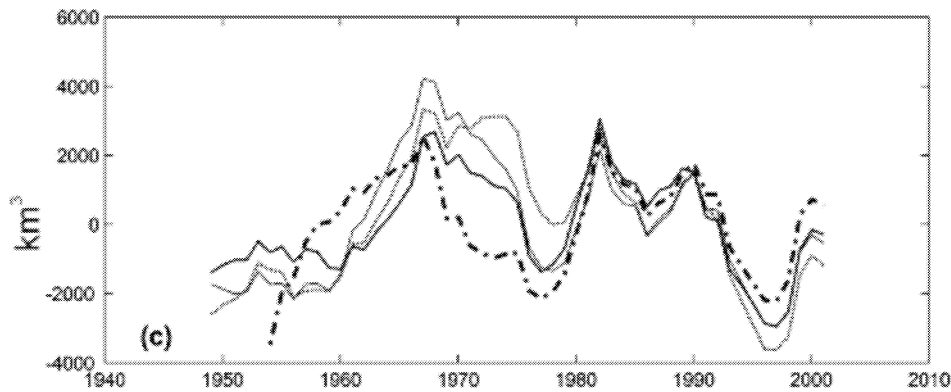


Fig. 1: Zeitserien des Süßwassergehalt der oberen 350m des Arktischen Ozeans: Alle vier Wiederholungen des Antriebs.

Ähnlich zu Beobachtungen finden wir eine Zunahme des mittleren Salzgehalts im Nordpolarmeer über die letzten Jahrzehnte. Der Rückgang des Süßwassergehalts im Nordpolarmeer über die simulierte NCEP Periode ist durch die Intensivierung der zyklonalen Zirkulation im Europäischen Nordmeer und im Eurasischen Becken des Nordpolarmeers zu erklären. Obwohl sich die Salzgehalte im Einstrom und Ausstrom kaum ändern, bedeutet diese erhöhte Austauschrate einen verstärkten Süßwasserexport aus dem Nordpolarmeer. Wegen der Aufenthaltsdauer des Atlantischen Wassers im Nordpolarmeer von bis zu 20 Jahren (Smethie et al. 2000) sind die Salzgehalte im Ausstrom noch kaum von dieser Entwicklung betroffen. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich ein neues Gleichgewicht mit höheren Salzgehalten im Nordpolarmeer in der Zukunft einstellt. Dies setzt allerdings voraus, dass die NAO, deren Intensivierung seit 1970 die Ursache für die ansteigenden Austauschraten ist, erneut auf ein ähnlich hohes Niveau ansteigt.

Im Salzgehalt der arktischen Halokline und der Atlantischen Schicht stellen wir eine ähnliche Entwicklung wie beim Wärmeinhalt fest. Mehrere Erwärmungsschübe, im Takt der quasi-dekadischen NAO, haben zu einer Erwärmung der Atlantischen Schicht mit einem Höhepunkt in den 1990er Jahren geführt. Die einzelnen Erwärmungsereignisse bauen hinsichtlich des Wärmeinhalts im Nordpolarmeer aufeinander auf, da die Wärme auf dekadischer Zeitskala und darüber hinaus weder durch die Oberfläche (isolierende Wirkung des Eises und der starken Salzgehaltssprung-

schicht) noch seitlich (wegen der langen Erneuerungszeitskala) aus dem Nordpolarmeer entweichen kann (Gerdes et al., 2003).

Beim Süßwassergehalt des Nordpolarmeers muss man die Abnahme des Eisvolumens berücksichtigen. Während auf dekadischer Zeitskala Schwankungen des Eis-transportes eine große Rolle für das Eisvolumen spielen, ist die langfristige Abnahme des Eisvolumens seit 1965 durch thermische Effekte bedingt (Köberle und Gerdes, 2003). Der Süßwassereintrag in den Ozean wirkt dem stärkeren ozeanischen Austausch mit dem Europäischen Nordmeer entgegen, kann dessen Wirkung aber bei Weitem nicht kompensieren.

Für das Europäische Nordmeer finden wir eine Zunahme des Süßwassergehalts um 4000 km^3 in den ersten 50 Jahren der Integration. Dieser Trend kehrt sich ab 1998 um, eine klare Unterscheidung von der auch vorhandenen dekadischen Variabilität ist aber nicht möglich. Demgegenüber steht eine entsprechende Abnahme des Süßwassergehalts im Nordpolarmeer um 14000 km^3 , ebenfalls mit einer möglichen Trendumkehr nach 50 Jahren. Die Differenz impliziert einen Süßwassertransport vom Nordpolarmeer in den subpolaren Atlantik südlich der Grönland-Schottland Schwelle von etwa 10000 km^3 . Wenn man die Abnahme des Eisvolumens um mehrere tausend km^3 im selben Zeitraum mit berücksichtigt, dann stimmt der simulierte Rückgang der arktischen Süßwasserreservoirs gut mit dem aus historischen Daten abgeschätzten Anstieg des Süßwassergehalts im subpolaren Atlantik überein (Curry und Mauritzen, 2005). Die Modellresultate deuten also auf eine arktische Quelle des beobachteten Süßwassergewinns des subpolaren Atlantiks.

Die Divergenz des Transports von Süßwasser durch alle Straßen weist starke zwischenjährliche Variabilität aber keinen nennenswerten Trend auf. Dies gilt ebenso für die Transporte von Meereis. Der Oberflächenfluss und die Speicherung von Süßwasser im Europäischen Nordmeer können den Trend nicht erklären. Die Aus-süßung des Europäischen Nordmeers ist allein das Ergebnis eines Ungleichgewichts, das fast während des gesamten modellierten Zeitraums besteht: Der Netto-Abtransport von Süßwasser (Einstrom salzreichen Wassers atlantischen Ursprungs und Aus-

strom salzarmen polaren Wassers) wird nicht vom Nettozufluss durch die Ozeanoberfläche (Niederschlag minus Verdunstung und Schmelzen von Meereis) und den kontinentalen Abfluss ausgeglichen.

Die Aussüßung des Europäischen Nordmeers ist auch im abnehmenden Salzgehalt im tiefen Ausstrom durch die Dänemarkstraße zu sehen. Der Trend im Modell wird von entsprechenden Beobachtungen, die sogar noch einen stärkeren Trend zeigen, bestätigt. Dickson et al. (2002) machen diesen Rückgang im Salzgehalt des Ausstroms durch die Dänemarkstraße für die beobachtete Aussüßung des tiefen subpolaren Atlantiks verantwortlich.

Eine geschlossene Bilanz des Arktischen Süßwassergehalts und deren zeitliche Entwicklung über 50 Jahre wurden berechnet (Abb. 2). Der Süßwassergehalt des Nordpolarmeers wird durch Süßwasserflüsse durch die Ozeanoberfläche und Transporte durch Framstraße, Kanadischen Archipel und Barentsseeöffnung bestimmt. Horizontale Transporte und Oberflächenflüsse betragen beide etwa je 3500 km^3 pro Jahr und zeigen über die modellierten 50 Jahre praktisch keinen Trend. Da sie häufig nicht in Phase sind, kann die Änderung des Arktischen Süßwassergehalts von einem Jahr zum anderen bis zu 3000 km^3 betragen. Die zwischenjährliche Variabilität des Süßwassergehalts ist von der Variabilität des Oberflächenflusses dominiert, die Transporte zeigen längerfristige Veränderungen.

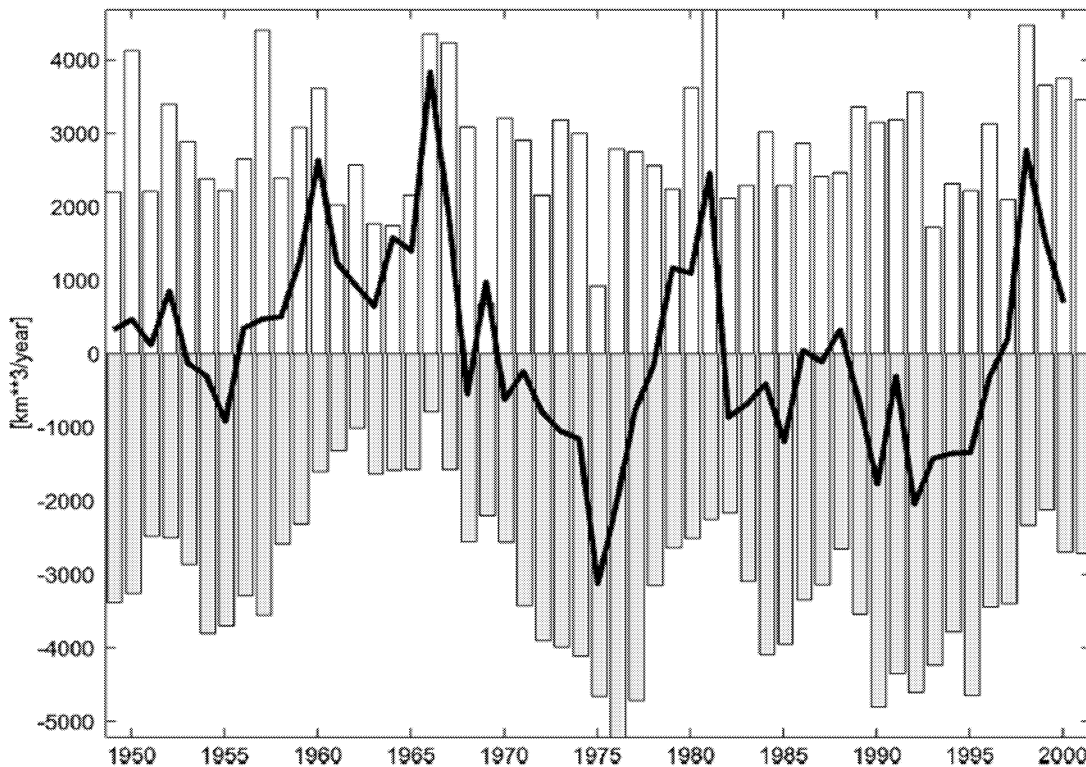


Abb. 2: Zeitserie des gesamten Oberflächensüßwasserflusses (positiv, weiße Balken) und des gesamten lateralen Süßwasserflusses (negativ, graue Balken). Die Linie repräsentiert die zeitliche Änderungsrate des arktischen Süßwassergehalts. Die gesamte Änderung zwischen Ende und Anfang des Experiments beträgt 4855 km^3 , was einem mittleren jährlichen Ungleichgewicht von $78 \text{ km}^3/\text{Jahr}$ entspricht.

Der Gesamtoberflächenfluss (Abb. 3) beinhaltet auch die Beiträge durch die Arktischen Flüsse und den Einstrom durch die Beringstraße, die allerdings nur eine sehr geringe zwischenjährliche Variabilität aufweisen (bedingt lediglich durch den lokalen Oberflächensalzgehalt, der für die Umrechnung von Süßwasser- in virtuelle Salzflüsse verwendet wird). Die Variabilität der Netto-Eisproduktion im Nordpolarmeer bestimmt die Variabilität der Oberflächenflüsse. Da im Jahresmittel immer mehr Eis gebildet wird als im Nordpolarmeer schmilzt, ist die Netto-Eisproduktion eine Süßwassersenke für den Arktischen Ozean. Die südwardigen Eistransporte sind ein Maß für diese Senke des flüssigen Süßwasserreservoirs.

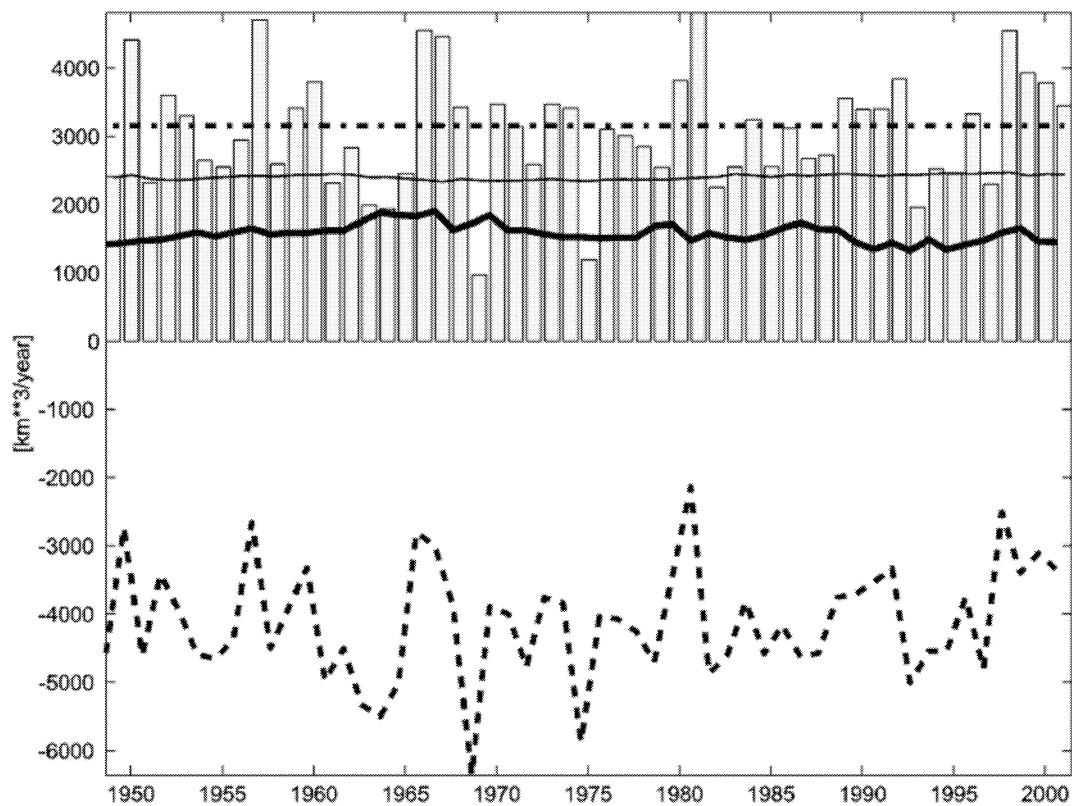


Abb. 3: Zeitserie des arktischen Oberflächensüßwasserflusses. Einheiten sind km^3/Jahr . Die grauen Balken zeigen den Nettofluss, die gestrichelte Linie den Nettobeitrag des thermodynamischen Eiswachstums, die Strich-Punkt Linie den zeitlich konstanten Korrekturfluss, die dicke Linie Verdunstung minus Niederschlag und die dünne Linie den Kontinentalabfluss.

Eine vollständige Analyse der lateralen flüssigen Süßwasserflüsse (Abb. 4) ergab, dass die Variabilität in den 54 Jahren des Experiments stark durch ein extremes Ereignis dominiert wird, das sich mit Auf- und Abbau über 15 Jahre erstreckt. Die Variabilität der Arktischen Süßwasserbilanz und insbesondere des lateralen Süßwassertransports außerhalb dieses Zeitraums ist vergleichsweise klein.

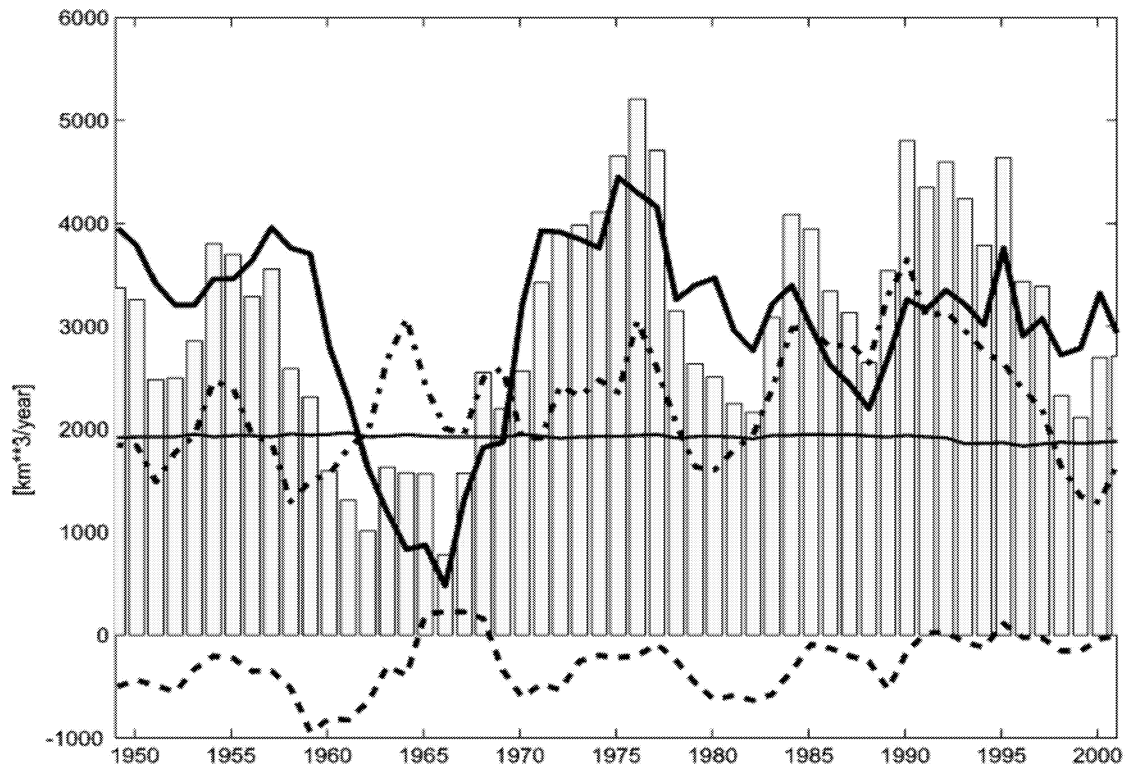


Abb. 4: Zeitserie des lateralen Süßwasserflusses aus dem arktischen Ozean. Einheiten sind km^3/Jahr . Die Balken stellen den Gesamtfluss dar, die dicke Linie den Anteil der Framstraße, die Strich-Punkt Linie den Anteil des kanadischen Archipels, die gestrichelte Linie den Anteil der Barentssee, die dünne Linie den Anteil der Beringstraße.

Die Ursachen des extrem geringen Süßwasserexports in den 1960er Jahren konnten wir im Modell wie folgt rekonstruieren. Eine außergewöhnliche Tiefdruckrinne existierte im langjährigen Mittel über dem Europäischen Nordmeer und erstreckte sich bis weit ins Nordpolarmeer hinein. Neben einem erhöhten Süßwasserexport aus der Barentssee trieben die anomalen Winde insbesondere einen erhöhten Ausstrom von Eis (Abb. 5) und Süßwasser aus der Barentssee nach Süden. Eis und salzarmes, vom Schmelzwasser modifiziertes Oberflächenwasser gelangten in den nordwärts setzenden Westspitzbergenstrom (WSC). Das zusätzliche Süßwasser im WSC reduziert den Dichtegradienten über die Framstraße und damit insbesondere den süd-

wärtigen Transport (Abb. 6; Köberle und Gerdes, 2006, im Druck).

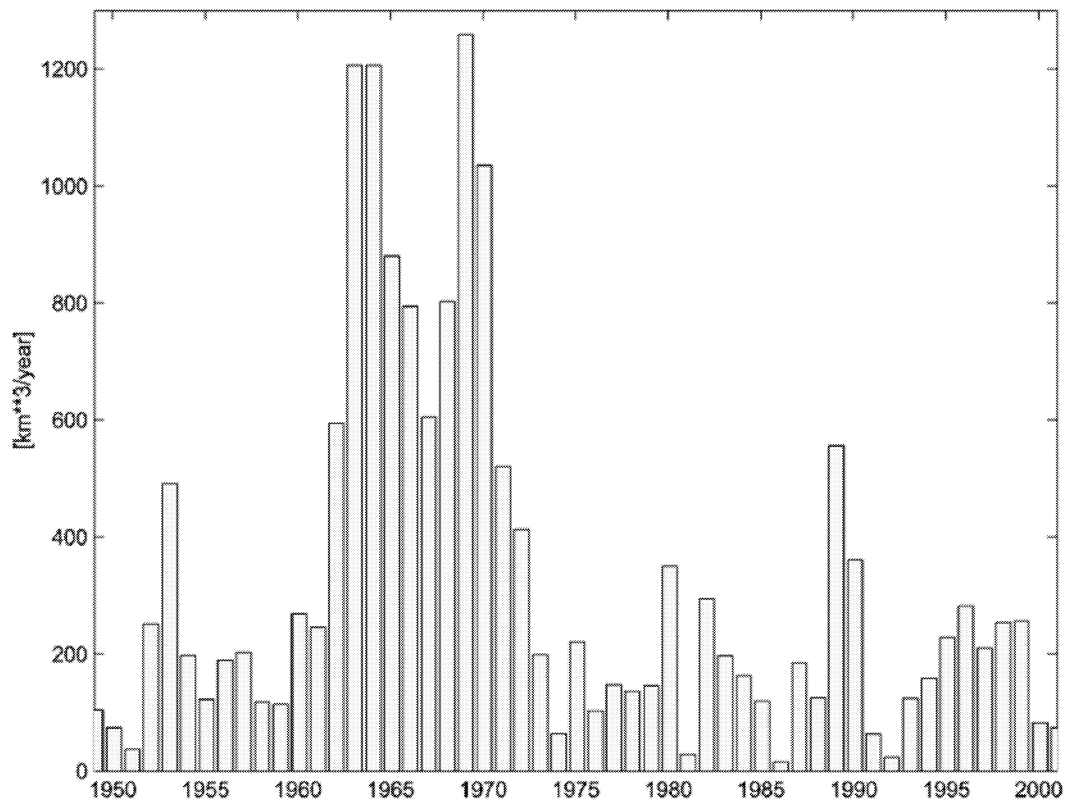


Abb. 5: Zeitserie des Nettoeistransports über einen Schnitt zwischen Svaalbard und Novaja Semlja. Positive Werte bezeichnen südwestlichen Transport. Der mittlere Transport über den Gesamtzeitraum beträgt $314\text{km}^3/\text{Jahr}$.

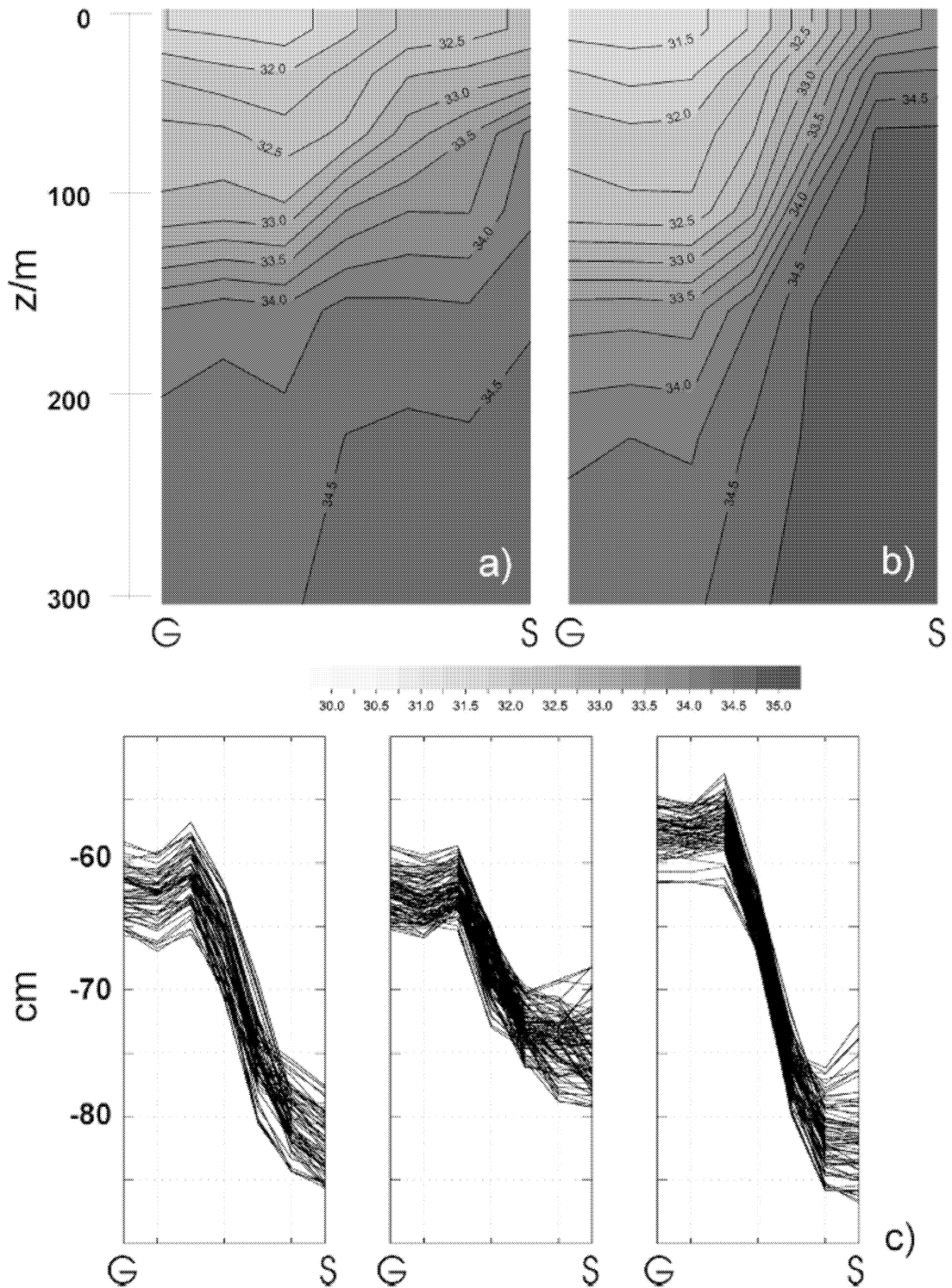


Abb. 6: Salzgehaltsschnitt durch die Framstraße, gemittelt a) über die Zeit mit niedrigem südwardigen Eisvolumentransport im Ostgrönlandstrom (August 1964 bis Juli 1965) und b) über die Zeit mit hohem südwardigen Eisvolumentransport im Ostgrönlandstrom (August 1972 bis Juli 1973). Intervall 0,25 psu. c) zeigt die sterische Höhe berechnet über 300m für die Jahre 1955-1959 (links), 1960-1967 (Mitte) und 1968-1975 (rechts). G und S bezeichnen die Küste Grönlands und Svalbaards.

Als erstes Experiment der Gruppe „Zukunftsszenarien“ wurde ein „water hosing“ Experiment durchgeführt. Dabei wurde über 100 Jahre eine Süßwasserflussanomalie von 0,1 Sv in einem Streifen entlang der Ost- und Westküste Grönlands in den Ozean eingebracht. Diese Anomalie kann als Ergebnis des von einigen Modellen (z. B. Huybrechts und de Wolde, 1999) vorhergesagten Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes interpretiert werden. Andere Quellen, die zu einer ähnlichen Verteilung in der anomalen bzw. erhöhten Süßwasserzufuhr führen können, sind ein langandauernder erhöhter Süßwasserexports aus der Arktis, wie er von Klimamodellen aufgrund des verstärkten hydrologischen Zyklus vorhergesagt wird. Ebenso führt die Entleerung des arktischen Reservoirs, wie sie in unseren bisherigen Arbeiten (Köberle und Gerdes, 2003) für die letzten beiden Jahrzehnte rekonstruiert wurden, zu einem Anstieg des Süßwassergehalts in den Randströmen um Grönland.

Dieses Experiment wurde mit einer globalen Modellversion durchgeführt, die zusätzlich eine einfache (Energiebilanz) Atmosphäre umfasst. Der Entwurf des Experiments wird als zusätzlicher Testfall für das Modellvergleichsprojekt der WCRP/CLIVAR Working Group on Ocean Model Development (WGOMD) dienen (Gerdes et al., 2005).

Wesentliches Ergebnis ist neben der Abschwächung der thermohalinen Zirkulation ein Anstieg des Meeresspiegels im Bereich der Labradorsee, des Europäischen Nordmeers und großer Teile der Arktis. Labradorsee-Wasser (LSW) wird salziger und im Lauf der Zeit durch ein sehr salzarmes Zwischenwasser ersetzt, das im Nordostatlantik gebildet wird (Gerdes et al, 2006).

Atmosphärische Daten aus Simulationen für das IPCC 4th assessment, die für ein oder mehrere Zukunftsszenarien benutzt werden sollen, wurden zunächst bewertet. Das Meereis ist eine der wichtigsten Größen in der Süßwasserbilanz und in gekoppelten Modellen bisher recht schlecht wiedergegeben. Daher wurden zentrale Eisparameter, nämlich Bedeckungsgrad und Dicke, analysiert. Da direkte Beobachtungen der Eisparameter räumlich und zeitlich dünn verteilt sind, wurde die Qualität der IPCC Modellresultate aus dem Vergleich mit Modelldaten unseres Modells bestimmt. Dies

Modell ist mit den vorhandenen Daten aus U-Boot Messungen validiert worden (Köberle und Gerdes, 2003) und hat sich gerade auch im Modellvergleich AOMIP von neuen gekoppelten Eis-Ozeanmodellen der Arktis als sehr gut herausgestellt. Die gekoppelten Modelle des IPCC zeigen tatsächlich erhebliche Unterschiede in diesen Parametern (Abb. 7).

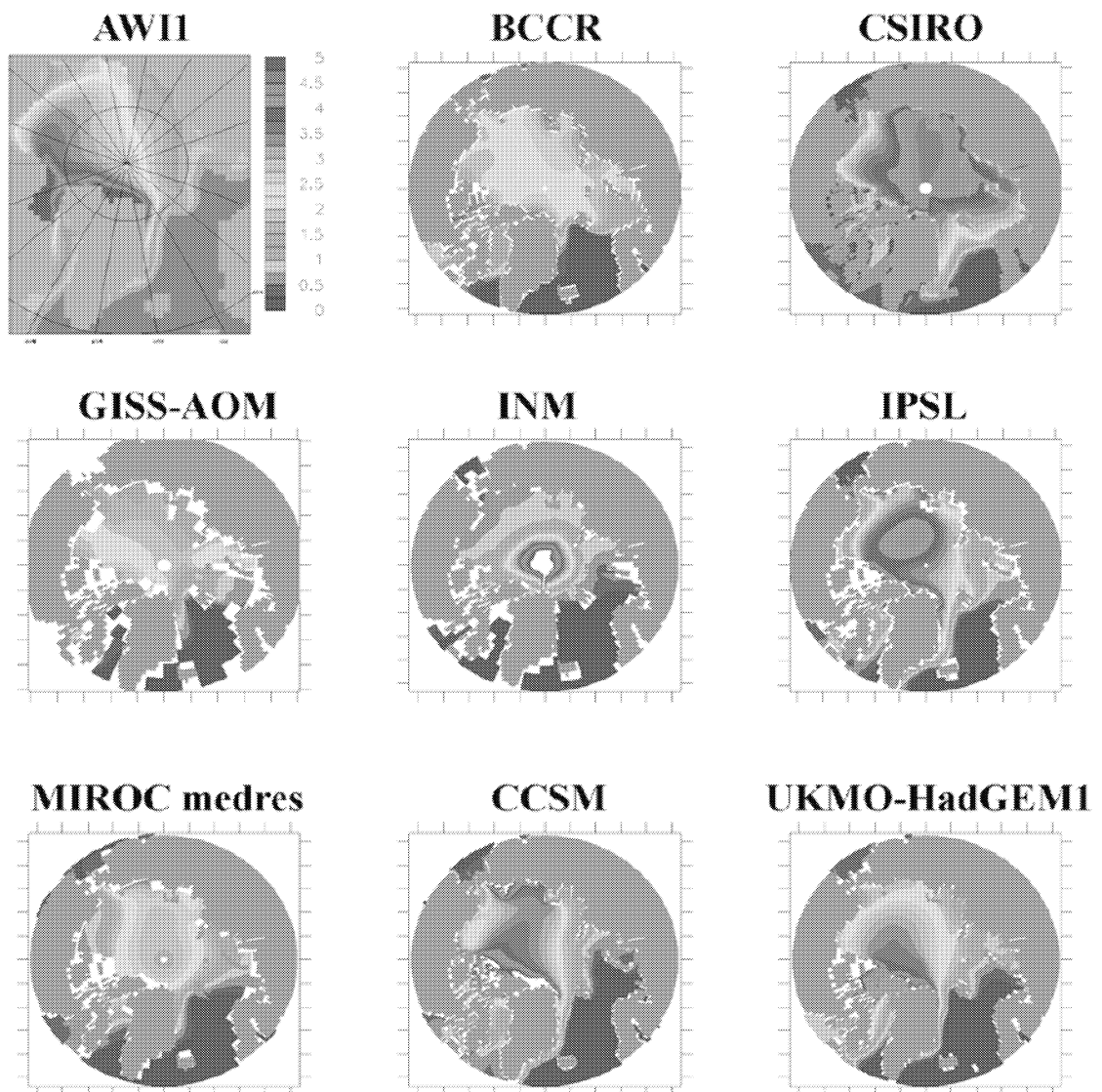


Abb. 7. Mittlere Meereisdicke für den Zeitraum 1950-2000 für unsere hindcast Simulation (oben links) und ausgewählte Klimamodelle (obere Zeile von links nach rechts: BCCR, CSIRO. Mittlere Zeile: GISS-AOM, INM, IPSL; Untere Zeile: MIROC medres, CCSM, and UKMO-HadGEM1).

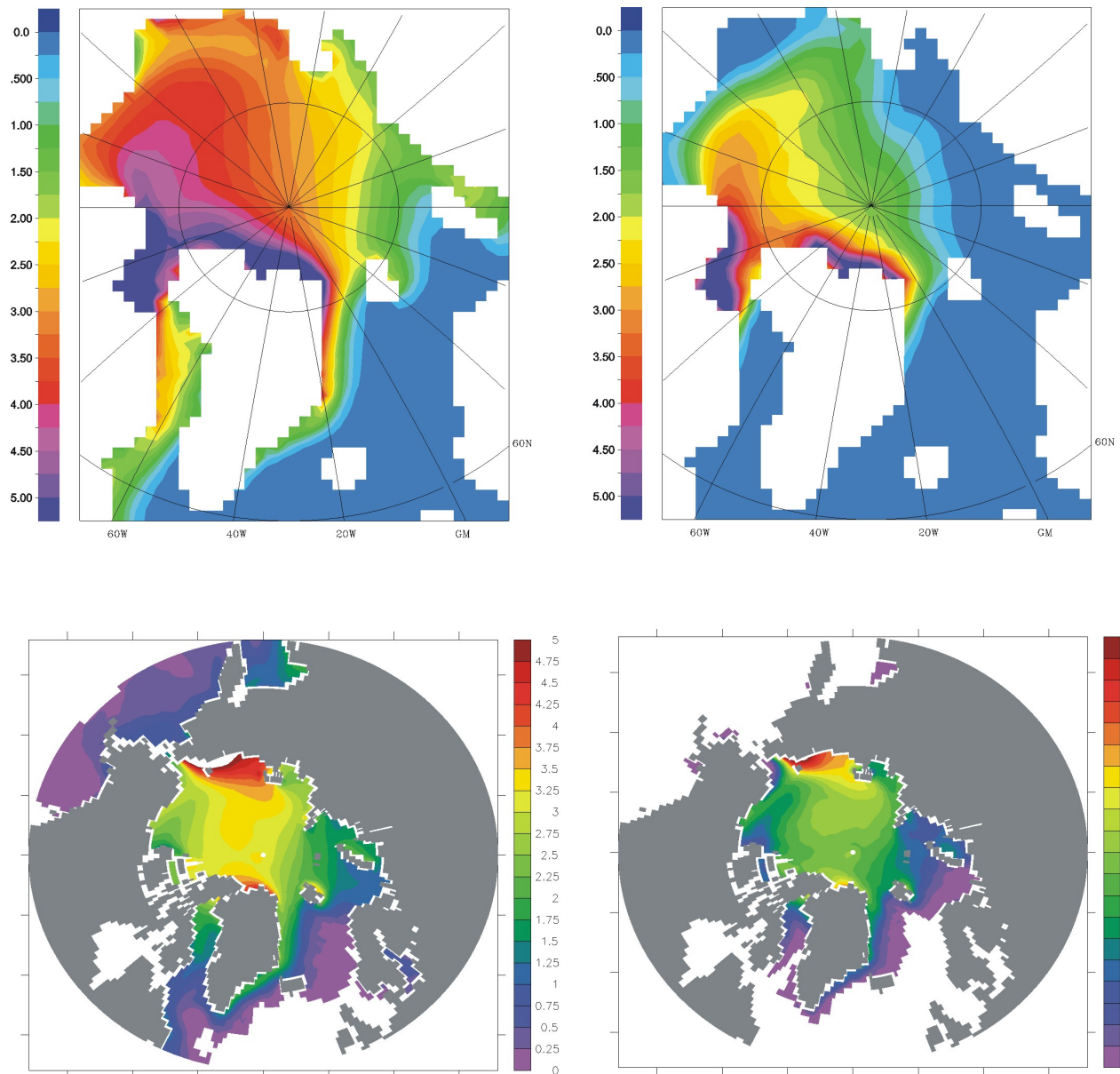


Abb. 8. Mittlere April (links) und September (rechts) Eisickenverteilungen im Mittel über die Jahre 1950 bis 2000. Oben: Resultate unserer hindcast Simulation, unten: PCM Modell Resultate.

Diese Unterschiede fallen weniger in arktisweit integrierten Größen ins Auge, dafür aber um so deutlicher in Karten der Sommer- und Wintermittel (Abb. 8). Für unser weiteres Vorgehen ist es günstig, dass dieser Vergleich wenige Modelle ergab, die hinsichtlich räumlicher Eisverteilung, Eisdicke und Eisvariabilität tauglich erscheinen. Dies sind namentlich die Modelle von IPSL, CCSM und des Hadley Centers.

II.2. Voraussichtlicher Nutzen

Süßwassertransport aus dem Nordpolarmeer und die dortige Speicherung von Süßwasser sind wichtige Größen, die die thermohaline Zirkulation beeinflussen können. Daher ist geplant, die gewonnenen Ergebnisse als Ausgangspunkt für die Unteraktivität “Erdsystem und Klima: Funktionieren und abrupte Änderungen” im Themenbereich 6 “Umwelt inklusive Klimawechsel” im 7. Rahmenprogramm der EU zu verwenden. Das schließt insbesondere die Benutzung der weiterentwickelten Modelle und der Bewertung der IPCC Ergebnisse bezüglich ihrer Eignung als Antriebsdaten für Zukunftsszenarien ein. Die Ergebnisse haben auch wichtige Hinweise zur Modellverbesserung erbracht. Diese Erkenntnisse fließen in die in anderen Projekten verwendeten Modellversionen ein.

II.3. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Johnson und Polyakov (2001) beschreiben den Anstieg des Oberflächensalzgehalts in der Laptevsee seit 1989. Die Ursache liegt in einer windbedingten Umlenkung des Flusswassers nach Osten und verstärkter Eisbildung, die mit Eisexport aus der Laptevsee heraus verbunden ist. Modellexperimente deuten auf eine beckenweite Bedeutung der Prozesse in der Laptevsee hin. Der Eisexport durch die Framstraße kann nach etwa 1970 gut durch den Winter NAO Index beschrieben werden. Dieser Zusammenhang besteht aber nicht für längere Zeiträume. Cavalieri (2002) findet eine konsistente Beziehung zwischen dem Eisexport und der Phase der zirkumpolaren Welle der Wellenzahl eins, die mit der Ausweitung des Islandtiefs in einen Trog bis in die Barentssee hinein zusammenhängt. Serreze et al. (2003) beschreiben die anomal geringe arktische Eisbedeckung im Sommer 2002, die ein Extremum im gesamten durch Satelliten beobachteten Zeitraum (seit 1978) darstellt. Als Ursachen werden Winde über der sibirischen Arktis und hohe sommerliche Temperaturen angegeben. Es bleibt ungeklärt, inwieweit eine positive Rückkoppelung zwischen Eisbedeckung oder -dicke und den atmosphärischen Verhältnissen zur Anomalie beiträgt.

Häkkinen und Proshutinsky (2004) betrachten die Variabilität des arktischen Süßwassergehalts in einer hindcast Simulation über die letzten 50 Jahre. Sie führen die Schwankungen auf Fluktuationen im lateralen Austausch mit dem Atlantik zurück. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen, obwohl sie gemischte Randbedingungen und ein Sigma-Koordinaten-Modell einsetzen.

Die Gruppe der in AOMIP arbeitenden Wissenschaftler ist in die Auswertungs- und Veröffentlichungsphase eingetreten. Beiträge zu einer Fülle von Aspekten des Modellvergleichs sind für einen Sammelband bei J. Geophys. Res. eingereicht und zum großen Teil bereits akzeptiert. Dabei sind die einzelnen Aspekte gruppenübergreifend bearbeitet worden. Eine Übersicht der bearbeiteten Themen und der Status der Artikel sind auf der AOMIP Website (http://fish.cims.nyu.edu/project_aomip/overview.html) angezeigt.

Im Laufe der letzten eineinhalb Jahre sind kontinuierlich Daten aus dem Fourth Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in die zugehörige Datenbank eingestellt worden. Die Datensammlung ist allerdings noch längst nicht vollständig im Sinne der veröffentlichten Variablenlisten, große Lücken gibt es insbesondere bei Meereis- und Ozeanflüssen sowie allgemein bei täglichen Daten. Für die Auswertung sind weltweit Wissenschaftler aufgerufen worden, sich unter Angabe der geplanten Projekte als Teilnehmer anzumelden. Wir sind für Meereis- und Süßwasserdatenauswertung eingetragen.

II.4. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Köberle, C. und R. Gerdes, 2003: Mechanisms determining Arctic sea ice conditions and export. *J. Climate*, 16, 2843-2858.

Gerdes, R., M.J.Karcher, F.Kauker, und U.Schauer, 2003: Causes and development of repeated Arctic Ocean warming events, *Geophysical Research Letters*, 30, 1980-1983.

Goose, H., Gerdes, R., Kauker, F., Köberle, C.(2004). On the causes of sea-ice volume variations during the period 1955-1997, *Journal of Climate*, 17(3), 1294-1305.

Steiner, N.,Holloway, G., Gerdes, R., Haekkinen, S., Holland, D., Karcher, M. J., Kauker, F., Maslowski, W., Proshutinsky, A., Steele, M., Zhang, J.(2004). Comparing modeled streamfunction, heat and freshwater content in the Arctic Ocean, *Ocean Modelling* 6, 265-284.

Brauch, J.P., und R. Gerdes, 2005: Reaction of the northern North Atlantic and Arctic oceans to a sudden change of the NAO, *J.Geophys.Res.*, 110, C11018, doi:10.1029/2004JC002436

Karcher, M., R.Gerdes, F.Kauker, C.Köberle, I.Yashayaev, 2005: Simulation of a 1990s fresh water event in the Nordic Seas and the subpolar North Atlantic, *Geophys.Res.Lett.*, 32, L21606, doi:10.1029/2005GL023861

Polyakov, I.V., A. Beszczynska, E.C. Carmack, I.A. Dmitrenko, E. Fahrbach, I.E. Frolov, R. Gerdes, E. Hansen, J. Holfort, V.V. Ivanov, M.A. Johnson, M. Karcher, F. Kauker, J.Morison, K.A. Orvik, U. Schauer, H.L. Simmons, O. Skagseth, V.T. Sokolov, M. Steele, L.A. Tomokhov, D. Walsh, J.E. Walsh, 2005: One more step towards a warmer Arctic. *Geophysical Research Letters*, 32, L17605, doi:10.1029/2005GL023740.

Proshutinsky, A., J. Yang, R. Krishfield, R. Gerdes, M. Karcher, F. Kauker, C. Köberle, S. Hakkinen, W. Hibler, D. Holland, M. Maqueda, G. Holloway, E. Hunke, W. Maslowski, M. Steele, J. Zhang, 2005: Arctic Ocean Study: Synthesis of Model Results and Observations, *Eos Trans. AGU*, 86(40), 368, 10.1029/2005EO400003.

Drange, H., R.Gerdes, Gao, M.Karcher, F.Kauker, M.Bentsen, 2005: Ocean General Circulation modelling of the Nordic Seas, in *The Nordic Seas: An integrated perspective*, Drange, H., T.Dokken, T.Furevik, R.Gerdes, und W.Berger (eds.) , AGU, Geophysical monograph 158, 199 - 220.

Gerdes, R., J. Hurka, M. Karcher, F. Kauker, und C. Köberle, 2005: Simulated history of convection in the Greenland and Labrador seas 1948-2001, in *The Nordic Seas: An integrated perspective*, Drange, H., T.Dokken, T.Furevik, R.Gerdes, and W.Berger (eds.) , AGU, Geophysical monograph 158, 221-238.

Gerdes, R., W.Hurlin, und S.M.Griffies, 2006: Sensitivity of a global ocean model to increased run-off from Greenland, *Ocean Modelling* 12(3/4), 416-435, doi: 10.1016/j.ocemod.2005.08.003

Gerdes, R., W.Hurlin, und S.M.Griffies, 2005: Reaction of the oceanic circulation to increased melt water flux from Greenland - a test case for ocean general circulation models, *Clivar Exchanges*, 33, 28-31.

Köberle, C. und R. Gerdes, 2006: Simulated variability of the Arctic Ocean fresh water balance, *J. Phy. Oc.* (im Druck).

Gerdes, R. und C. Koeberle, 2006: Comparison of Arctic sea ice variability in IPCC climate of the 20th century experiments and ocean sea ice hindcasts, *J. Geophys. Res.* (im Druck).

Referenzen

Aagaard, K. und E.C. Carmack, 1989, The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation, *J.Geophys.Res.*, 94, 14485-14498

Arfeuille, G., L.A. Mysak, und L.-B. Tremblay, 2000, Simulation of the interannual variability of the wind-driven Arctic sea-ice cover during 1958-1998, *Climate Dynamics*, 16, 107-121

Beersma, J.J., M.Rider, G.J.Komen, E.Kaas, und V.V.Kharin, 1997, An analysis of extra-tropical; storms in the North Atlantic region as simulated in control and 2xCO₂ time slice experiment with a high-resolution atmospheric model, *Tellus*, 49A, 347-361

Belkin, I.M., S.Levitus, J.Antonov, und S.-A. Malmberg, 1998, "Great Salinity Anomalies" in the North Atlantic, *Prog.Oceanogr.*, 41, 1-68

Brauch, J, R Gerdes, M Karcher, F Kauker, und C Köberle, 1999: Response experiments with NAO related forcing, , *ICES CM 1999/L:28*, 6pp.

Carmack, E.C., 2000, The Arctic Ocean's freshwater budget: sources, storage and export, in L.E.Lewis (ed.), *The Arctic Ocean freshwater budget*, NATO ARW, Kluwer, Dordrecht, 91-126

Cavaliere, Donald J, 2002. A link between Fram Strait sea ice export and atmospheric planetary wave phase. *Geophys. Res. Lett.*, 29. 12, 1614, doi:10.1029/2002GL014684, 2002.

Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.-A., und Lee, A.J., 1988, The "Great Salinity Anomaly" in the northern North Atlantic 1968-1982, *Prog.Oceanogr.*, 20, 103-151

Dickson, R.R., Osborn, T.J., Hurrell, J.W., Meincke, J., Blindheim, J., Adlandsvik, T., Vinje, G., Alekseev, G. and Maslowski, W., 2000
"The Arctic Ocean response to the North Atlantic Oscillation.". *Journal of Climate* 13(15), 2671-2696 (R)

Dickson, B., I. Yashayaev, J. Meincke, B. Turrel, S. Dye, and J. Holfort (2002). Rapid

freshening of the Deep North Atlantic Ocean over the Past Four Decades. *Nature*, 416, 832-837.

Gerdes, R, 2000: Modelling the variability of exchanges between the Arctic Ocean and the Nordic Seas, in L.E.Lewis (ed.), *The Arctic Ocean freshwater budget*, NATO ARW, Kluwer, Dordrecht, 533-547

Gerdes, R und C Köberle, 1995: On the influence of DSOW in a numerical model of the North Atlantic general circulation, *J.Phys.Oceanogr.* **25**, 2624-2642

Gerdes, R, und C Köberle, 1999: Numerical simulation of salinity anomaly propagation in the Nordic seas and the Arctic Ocean, *Polar Research*, 18 (2), 159-166

Gerdes, R und U Schauer, 1997: Large-scale circulation and water mass distribution in the Arctic Ocean from model results and observations, *J.Geophys.Res.*, **102** (C4), 8467-8483

Hagemann, S., und L. Dümenil, 1998, Documentation for the hydrological discharge model. Technical Report No. 20, Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg

Häkkinen, S., 1993, An Arctic source for the Great Salinity Anomaly: A Simulation of the Arctic ice-ocean system for 1955-1975, *J.Geophys.Res.*, 98 (C3), 16397-16410

Häkkinen, S. und A. Proshutinsky (2004): Freshwater content variability in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 109,C03051, doi:10.1029/2003JC001940.

Hilmer, M., and T. Jung, 2000, Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic sea ice export, *Geophys.Res.Lett.*, 27, 989-992

Hilmer, M., M.Harder, und P.Lemke, 1998, Sea ice transport: a highly variable link between Arctic and North Atlantic, *Geophys.Res.Lett.*, 25, 3359-3362

Huybrechts, P., de Wolde ,J. (1999): The dynamic response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multiple-century climatic warming, *J. Climate*, **12**, 2169-2188.

Melling, H., 2004: Fluxes Trough the Northern Canadian Arctic Archipelago, ASOF Newsletter No. 2, 3-7, (Unpublished Manuscript).

Johnson, M. A. , I. Polyakov. 2001. The Laptev Sea as a source for recent Arctic Ocean salinity change. *Geophysical Research Letters* 28 (10): 2017-2020.

Karcher, M. J., Gerdes, R., Kauker, F., Koeberle, C.(2003).Arctic warming - Evolution and Spreading of the 1990s warm event in the Nordic Seas and the Arctic Ocean,, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108(C2), 3034, doi:10.1029/2001JC001265.

Koeberle, C., Gerdes, R., Kauker, F.(1999).Mechanisms determining Fram Strait ice export variability, *ICES ASC 1999 - CM 1999/L:25*, 7

- Kwok, R., und D.A. Rothrock, 1999, Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic Oscillation, *J.Geophys.Res.*, 104, 5177-5189
- Lohmann, G, R Gerdes, und D Chen, 1996: Sensitivity of the thermohaline circulation in coupled oceanic GCM - atmospheric EBM experiments. *Climate Dynamics*, 12, 403-416
- Lohmann G, and R Gerdes, 1998: Sea ice effects on the sensitivity of the thermohaline circulation. *Journal of Climate*, 11, 2789-2803
- Mauritzen, C., and S. Häkkinen, 1997, Influence of sea ice on the thermohaline circulation in the Arctic-North Atlantic Ocean, *Geophysical Research Letters*, 24, 3257-3261
- Melling, H., 2000, Exchanges of freshwater through the shallow straits of the North American Arctic, in L.E.Lewis (ed.), *The Arctic Ocean freshwater budget*, NATO ARW, Kluwer, Dordrecht, 479-502
- Pacanowski, R.C., 1996, MOM 2 Version 2. Documentation, user's guide and reference manual. Technical Report, 3.2, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Ocean Group, Princeton, N.J.
- Peterson, B. J., R. M. Holmes, J. W. McClelland, C. J. Vörösmarty, R. B. Lammers, A. I. Shiklomanov, I. A. Shiklomanov und S. Rahmstorf, 2002: Increasing River discharge to the Arctic Ocean, *Science*, 298, 2171-2173.
- M. C. Serreze, J. A. Maslanik, T. A. Scambos, F. Fetterer, J. Stroeve, K. Knowles, C. Fowler, S. Drobot, R. G. Barry und T. M. Haran, 2003. A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 30, NO. 3, 1110, doi:10.1029/2002GL016406, 2003.
- Prange, M.(2003). Einfluss arktischer Süßwasserquellen auf die Zirkulation im Nordpolarmeer und im Nordatlantik in einem prognostischen Ozean-Meereis-Modell, *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, 468, 219pp, Universität Bremen.
- Prange, M, und R Gerdes, 1999: Influence of Arctic river runoff on the circulation in the Arctic Ocean, the Nordic Seas, and the North Atlantic, *ICES ASC 1999 – CM 1999/L:11*, 5 pp.
- Prange, M., Gerdes, R.(2006). The role of surface freshwater flux boundary conditions in Arctic Ocean models, *Ocean modelling*, 13(1), 25-43, doi:10.1016/j.ocemod.2005.09.003.
- Prinsenbergh S. J. und J. Hamilton, 2004: The Oceanic Fluxes Trough Lancaster Sound of the Canadian Archipelago, *ASOF Newsletter*, No. 2, 8-11 (Unpublished Manuscript)..
- Reverdin, G., D. Cayan, H.D.Doolby, D.J.Ellet, S.Levitus, Y.duPenhoat, und

- A.Dessier, 1994, Surface salinity of the North Atlantic: Can we reconstruct its fluctuations over the last one hundred years? *Prog.Oceanogr.*, 33, 303-346
- Rogers, J.C., 1990, Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1896) and associated wave cyclonic frequencies, *J.Clim.*, 3, 1364-1379
- Rothrock, D.A., Y.Yu, und G.A.Maykut, 1999, Thinning of the Arctic sea-ice cover, *Geophys.Res.Lett.*, 26, 3469-3472
- Rudels, B., und H.J.Friedrich, 2000, The transformations of Atlantic Water in the Arctic Ocean and their significance for the freshwater budget, in L.E.Lewis (ed.), *The freshwater budget of the Arctic Ocean*, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 623 p., 2000.
- Schauer, U., R.D. Muench, B. Rudels, and L. Timokhov (1997), Impact of eastern arctic shelf waters on the Nansen Basin intermediate layers, *Journal of Geophysical Research*, 102, 3371-3382.
- Schauer, U., B. Rudels, E.P. Jones, L.G. Anderson, R.D. Muench, G. Björk, J.H. Swift, V. Ivanov, and A.M. Larsson (2002), Confluence and redistribution of Atlantic water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins, *Annales Geophysicae*, 20(2), 257-273.
- Smethie, W.M., P.Schlosser, G.Boenisch, T.S. Hopkins, Renewal and circulation of intermediate waters in the Canadian Basin observed on the SCICEX 96 cruise, *J.Geophys.Res.*, 105, 1105-1121, 2000
- Steele, M. and Boyd, T. (1998) Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean, *J.Geophys.Res.*, 103 (C5), 10419-10435
- Steele, M., D. Thomas, und D. Rothrock, 1996, A simple model study of the Arctic freshwater balance, 1979-1985
- Sutton, R.T., und M.R. Allen, 1997, Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate, *Nature*, 388, 563-567
- Vinje T., Nordlund, N., und Kvambekk, A., 1998, Monitoring ice thickness in Fram Strait, *J.Geophys.Res.*, 103(C5), 10437-10449
- Zhang, J., Hibler, W.D., Steele, M., und Rothrock, D.A., 1998, Arctic ice-ocean modeling with and without climate restoring, *J.Phys.Oceanogr.*, 28, 191-217